

# Effet des Transferts Thermiques dans les Mousses Métalliques Catalytiques sur la déshydrogénation et la déshydrogénation oxydante des hydrocarbures.

I. Pitault, M.-L. Zanota, Y. Swesi, V. Meille, S. Pallier

*Laboratoire de Génie des Procédés Catalytiques,  
CNRS-CPE Lyon, 69616 Villeurbanne, France*

A. Löfberg, A. Essakhi, E. Bordes-Richard, S. Paul

*Unité de Catalyse et de Chimie du Solide,  
USTL-ENSCL-ECL, 59655 Villeneuve d'Ascq, France*

# Objectifs du projet

## Trois Parties :

1. Contrôler et améliorer l'enduction des mousses.
2. Eviter la corrosion des objets enduits.
3. Performances des structures enduites utilisées pour différentes réactions.

? **Performances des mousses comme supports de catalyseurs** ?

# Comparaison des mousses et des billes pour des réacteurs à lits fixes.

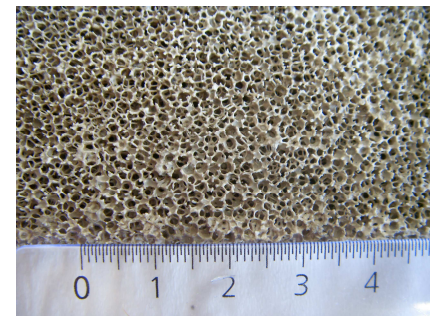
Nécessite la **même masse** de catalyseur par volume de réacteur, et la **même phase active**:

➡ préparation de billes et de mousses enduites avec la même quantité de catalyseur.

➡ tests dans le même réacteur dans les mêmes conditions.

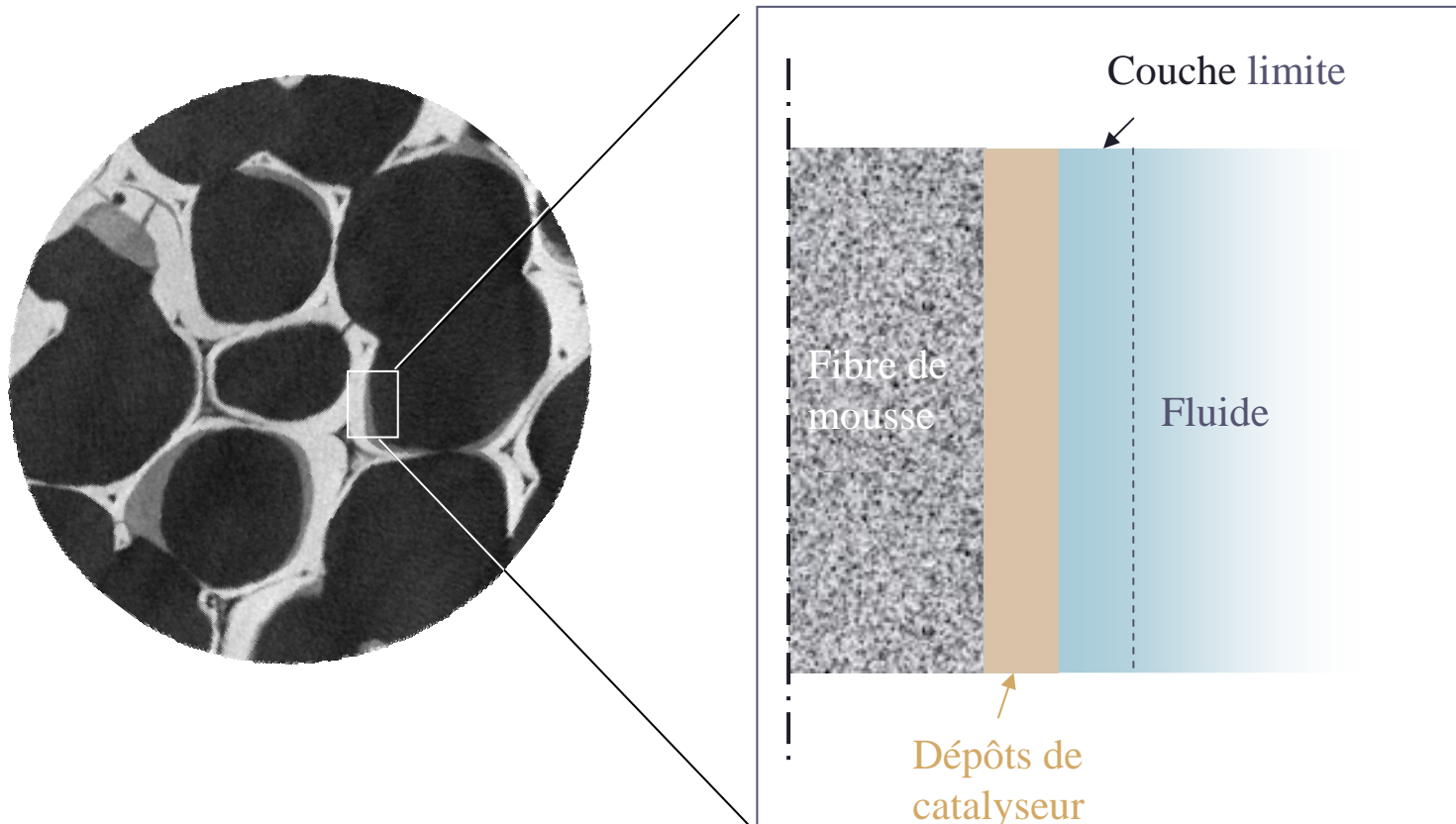


Comparaison des **gradients thermiques** dans les mousses et dans un lit de billes pour des réactions très endo ou exothermiques.



# Chimie et transferts.

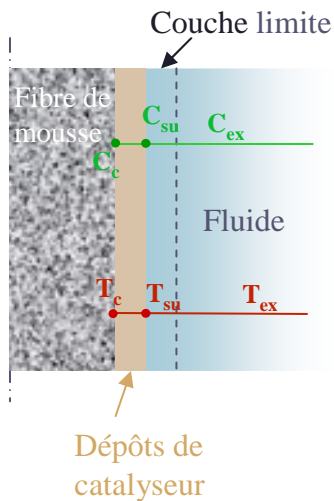
Apporter les molécules de réactif dans le catalyseur  
et transférer la chaleur de réaction.



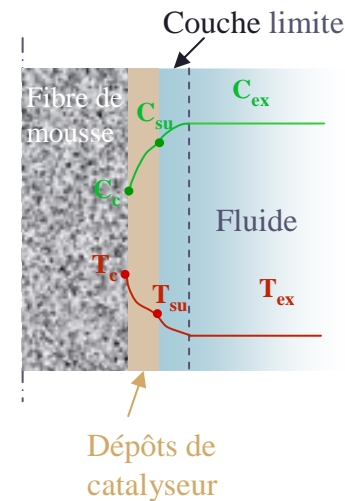
# Chimie et transferts.

Apporter les molécules de réactif dans le catalyseur  
et transférer la chaleur de réaction.

Réactions « lentes » :  
augmenter la masse de catalyseur  
sans boucher la porosité de la  
mousse.



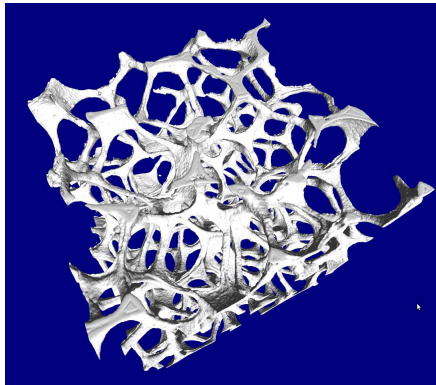
Réactions « rapides » :  
augmenter la surface spécifique du  
catalyseur et la turbulence dans les  
cellules.



# Supports catalytiques étudiés.

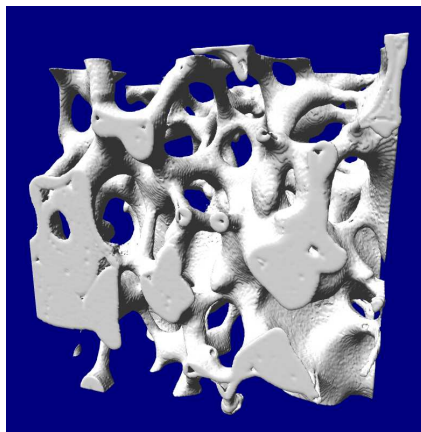
**Mousse FeCrAlloy:**  
**Porvair Advanced Material (USA)**

**F1: Metallic foams FeCrAl -33 ppi  $\epsilon=97\%$**



$D_s = 160\mu\text{m}$   
 $D_c = 1480\mu\text{m}$   
 $S_{spe} = 1384\text{ m}^2/\text{m}^3$   
 $\epsilon = 0.94$

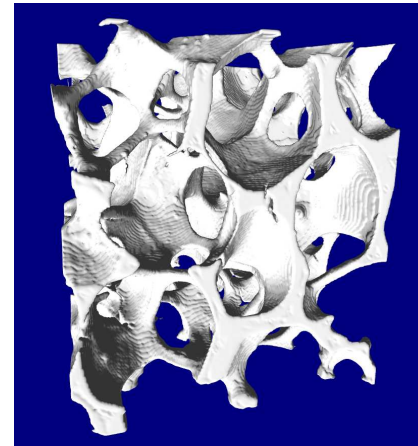
**F2: Metallic foams FeCrAl - 33 ppi  $\epsilon=81\%$**



$D_s = 620\mu\text{m}$   
 $D_c = 1690\mu\text{m}$   
 $S_{spe} = 1700\text{ m}^2/\text{m}^3$   
 $\epsilon = 0.74$

**Mousse Alumine: Centre de Transfert de  
Technologies Céramiques (Limoges)**

**F3: Ceramic foam Alumina -37 ppi-  $\epsilon=87\%$**



$D_s = 260\mu\text{m}$   
 $D_c = 1150\mu\text{m}$   
 $S_{spe} = 1801\text{ m}^2/\text{m}^3$   
 $\epsilon = 0.74$

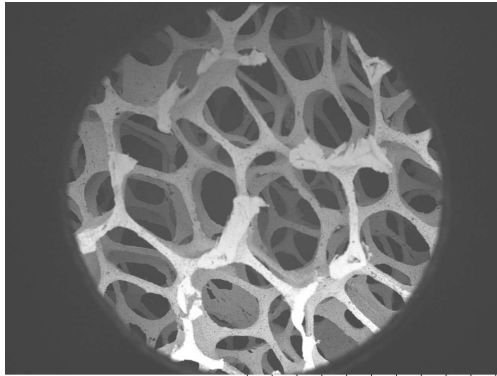
**Molecular sieves Beads: 2mm**



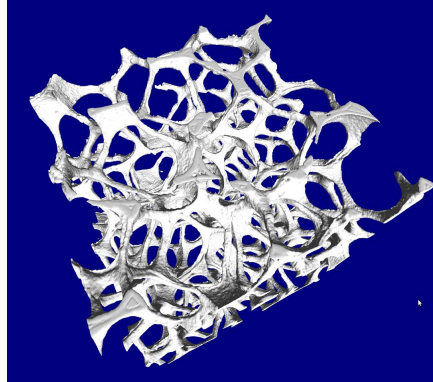
$S_{spe} = 1800\text{ m}^2/\text{m}^3$   
 $\epsilon = 0.4$

# Supports catalytiques étudiés.

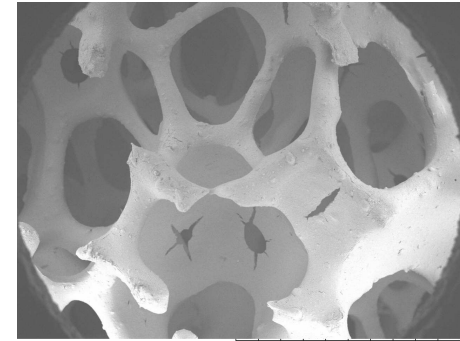
## F1: Metallic foams FeCrAl -33 ppi $\epsilon=97\%$



FeCrAl\_330001  
D7,8 x25 4 mm  
mousse en FeCrAl 33 ppi

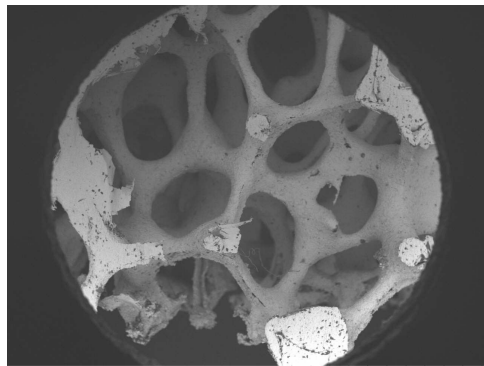


## F3: Ceramic foam Alumina -37 ppi- $\epsilon=87\%$

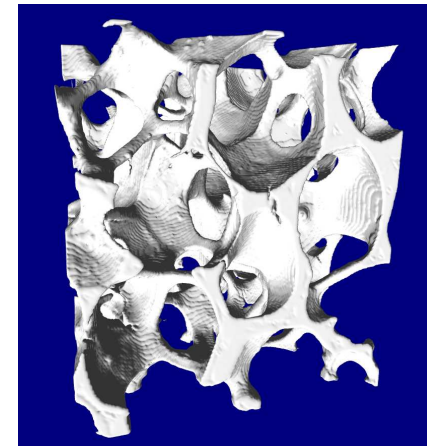
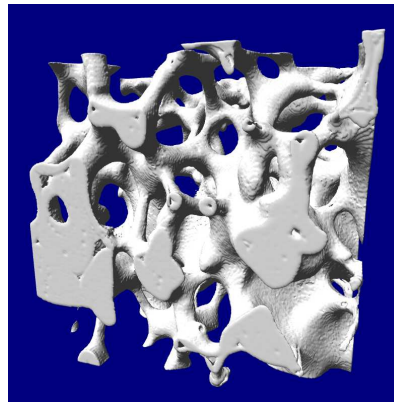


alumine0002  
D2,2 x50 2 mm  
mousse en Alumine sans cata

## F2: Metallic foams FeCrAl - 33 ppi $\epsilon=81\%$

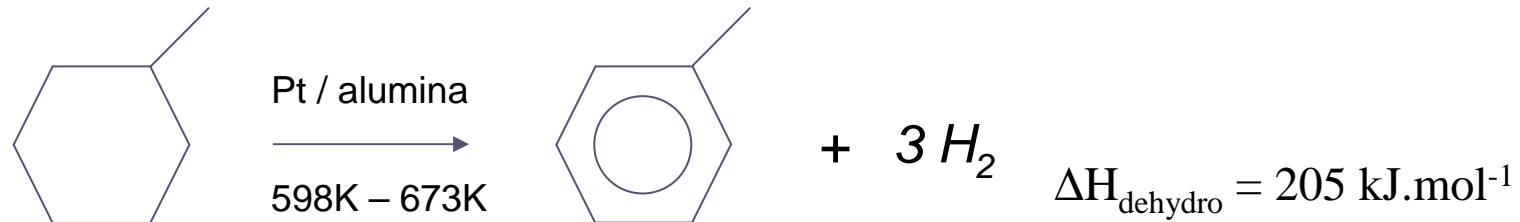


DenseFoam0001  
2009/04/07 16:50 x40 2 mm



# Propriétés de transferts hydrodynamique et thermique.

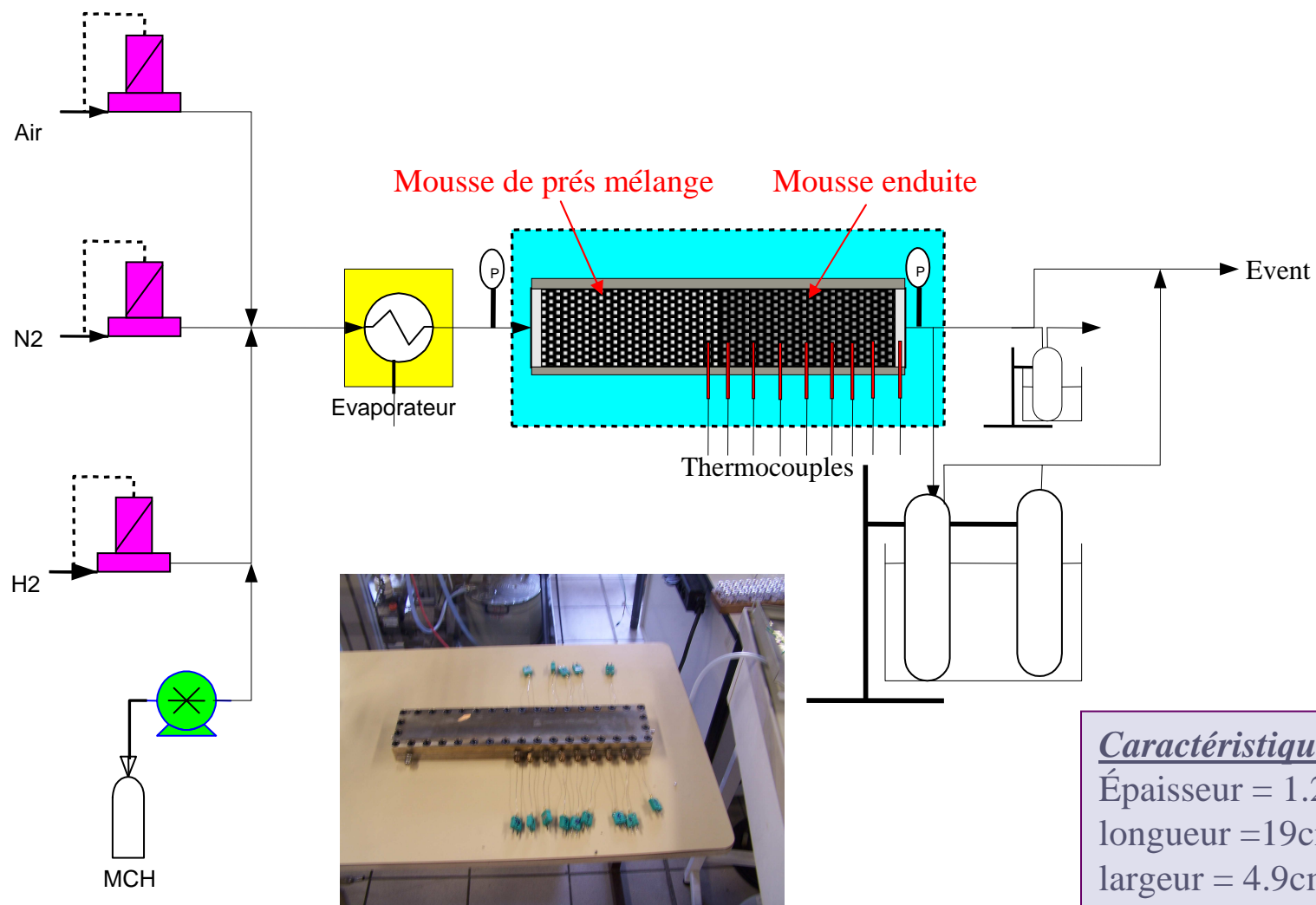
- Mesure de la perte de charge.
- Etude des transferts de chaleur:
  1. Conduction pure (pas de gaz) entre 100 et 300°C.
  2. Conduction et convection à différentes températures et débits de gaz.
  3. Conduction et convection couplées avec une réaction endothermique (LGPC) ou exothermique (Lille).



**Pas de limitation de transfert externe**, réaction lente mais avec un **gradient thermique important** dans un lit de pellets.

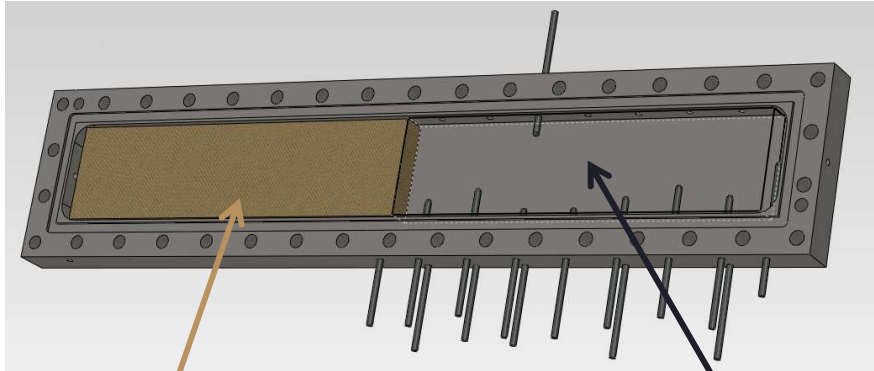


# Dispositif expérimental.



# Réacteur.

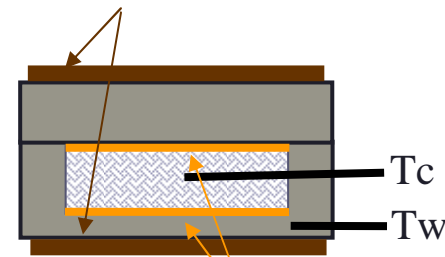
Thermocouple pour  
consigne de température



Mousse inerte:  
Distribution et  
chauffage homogène

Mousse enduite

Plaques chauffantes



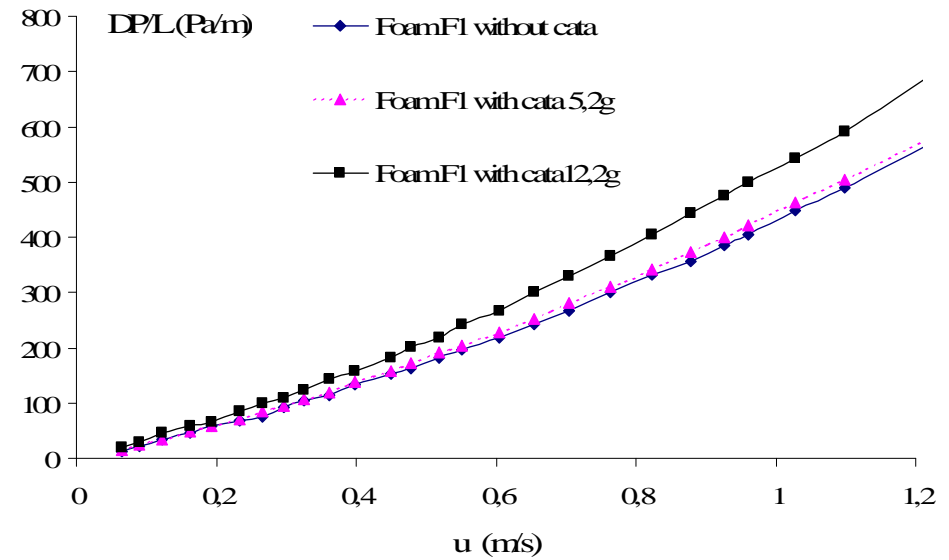
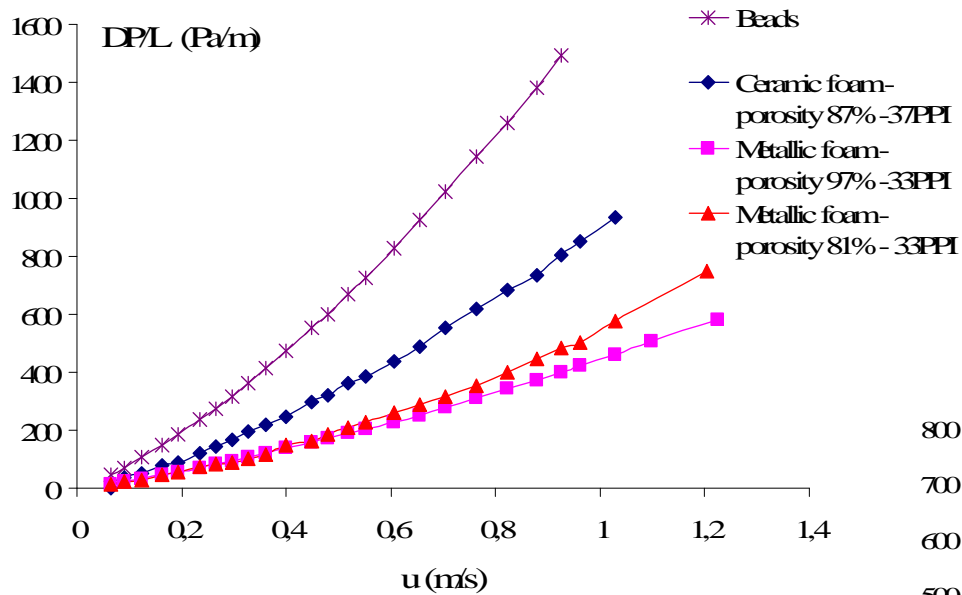
Feuilles d'acier inox  
( Réduit les by-pass)

Température = 300- 325 -350 - 375°C

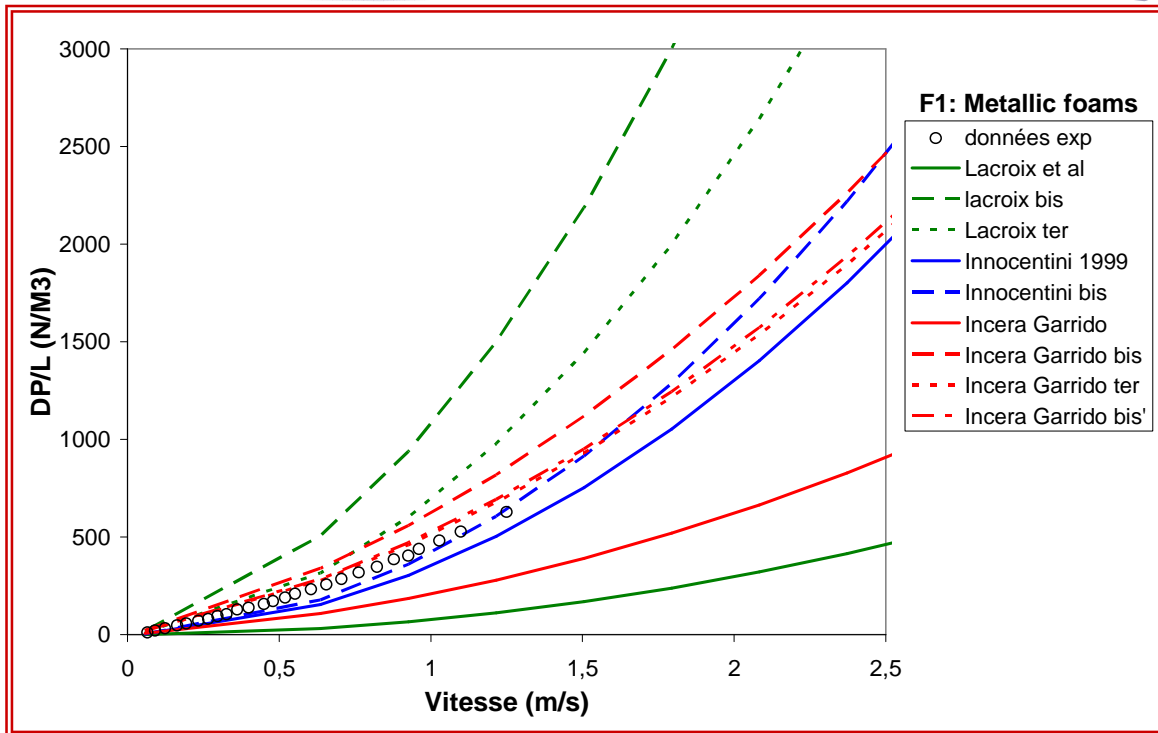
Débit MCH = 1- 2 - 4 - 6 - 8 g/min

Q\_H2 = 0.45 - 1 - 2 LSTP/min

# Perte de charge : Effet de porosité du lit et de l'enduction de la mousse.



# Comparaison avec quelques corrélations.



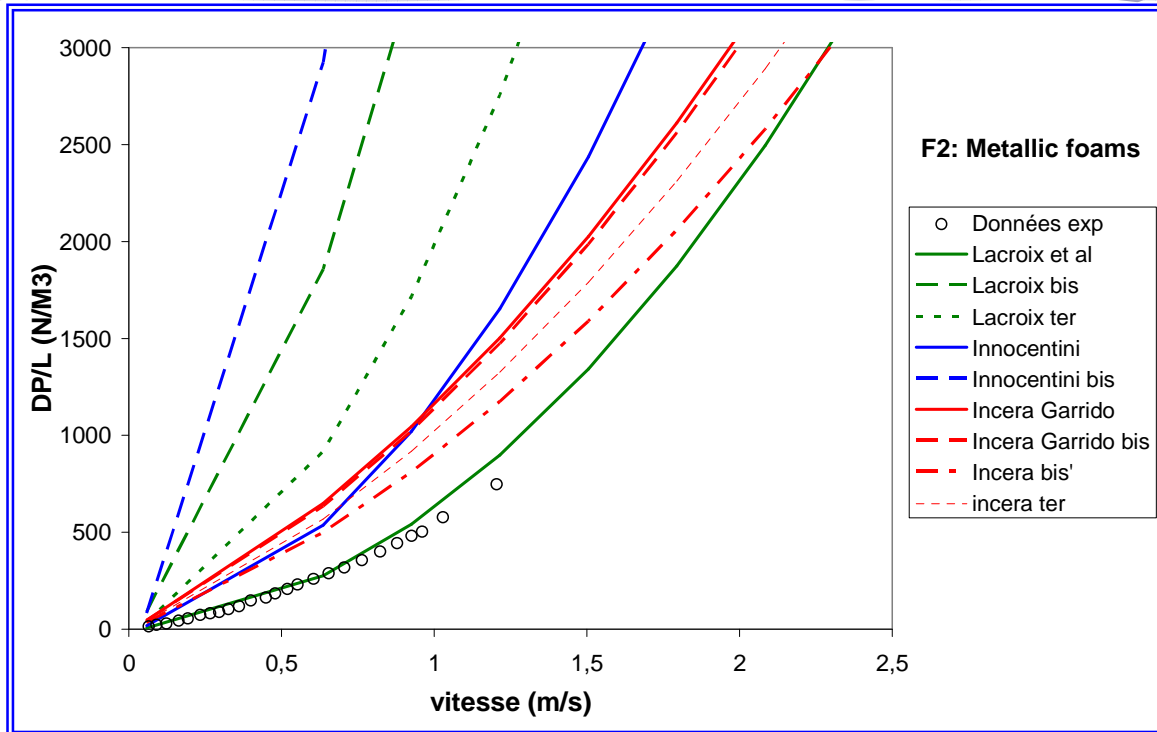
Données fabricant

PPI = 33

$\epsilon = 97\%$

IMorph	Lacroix et al	Innocentini et al	Incera Garrido et al
$D_s = 160 \mu\text{m}$ $D_c = 1480 \mu\text{m}$ $\epsilon = 0.94$	$D_p = f(\epsilon_{fab}, PPI) = 939 \mu\text{m}$ $D_p^{bis} = f(\epsilon_{Imorph}, \phi_{sphere}) + \text{cubique}$ $D_p^{bis} = 170 \mu\text{m}$ $D_p^{ter} = f(\epsilon_{Imorph}, d_{strut})$ $D_p^{ter} = 240 \mu\text{m}$	$D_p = f(\epsilon_{fab}, PPI) = 228 \mu\text{m}$ $D_p^{bis} = f(\phi_{sphere}) + \epsilon_{Imorph}$ $D_p^{bis} = 527 \mu\text{m}$	$D_p = f(\epsilon_{fab}, PPI) = 4924 \mu\text{m}$ $D_p^{bis} = f(\phi_{sphere} + \phi_{struts}) = 1640 \mu\text{m}$ $D_p^{bis'} = f(\phi_{ellipse}^{max} + \phi_{struts}) = 1774 \mu\text{m}$ $D_p^{ter} = f(a, b, c_{ellipsee}) = 1980 \mu\text{m}$

# Comparaison avec quelques corrélations.



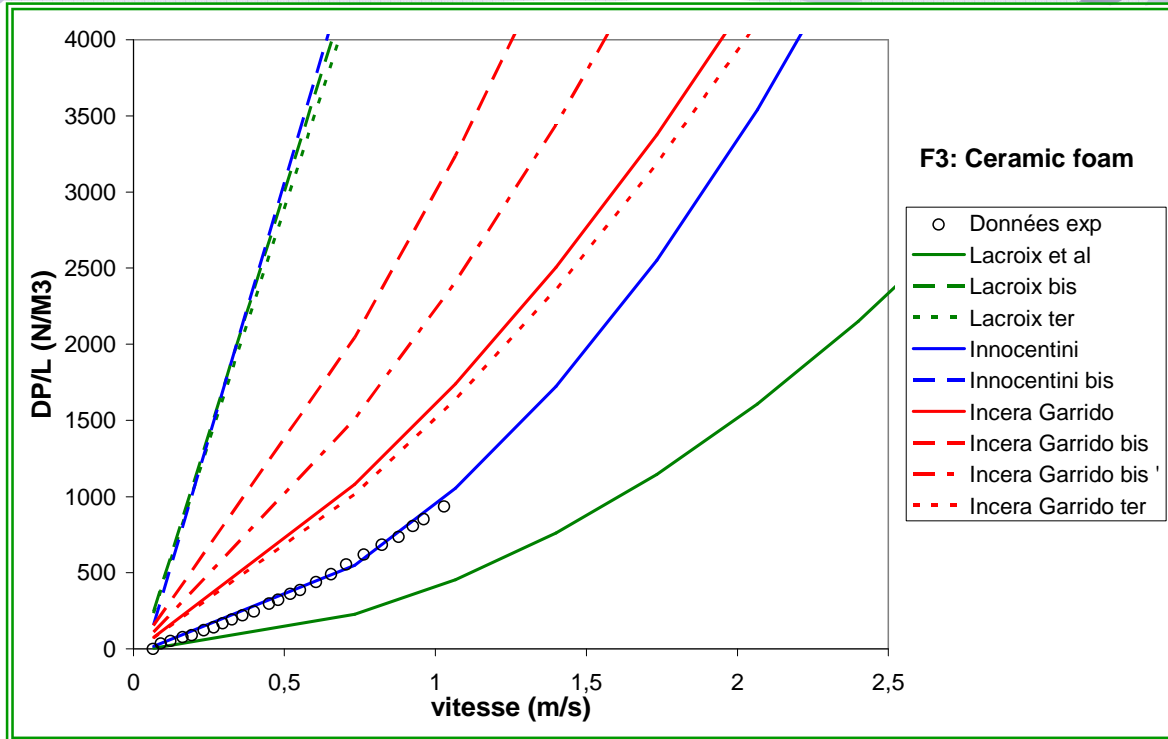
Données fabricant

PPI = 33

$\varepsilon = 81\%$

IMorph	Lacroix et al	Innocentini et al	Incera Garrido et al
$D_s = 650 \mu\text{m}$ $D_c = 170 \mu\text{m}$ $\varepsilon = 0.74$	$D_p = f(\varepsilon_{fab}, PPI) = 1400 \mu\text{m}$ $D_p^{bis} = f(\varepsilon_{Imorph}, \phi_{sphere}) + \text{cubique}$ $D_p^{bis} = 568 \mu\text{m}$ $D_p^{ter} = f(\varepsilon_{Imorph}, d_{strut})$ $D_p^{ter} = 930 \mu\text{m}$	$D_p = f(\varepsilon_{fab}, PPI) = 828 \mu\text{m}$ $D_p^{bis} = f(\phi_{sphere}) + \varepsilon_{Imorph}$ $D_p^{bis} = 896 \mu\text{m}$	$D_p = f(\varepsilon_{fab}, PPI) = 2350 \mu\text{m}$ $D_p^{bis} = f(\phi_{sphere} + \phi_{struts}) = 2400 \mu\text{m}$ $D_p^{bis'} = f(\phi_{ellipse}^{max} + \phi_{struts}) = 3000 \mu\text{m}$ $D_p^{ter} = f(a, b, c_{ellipse}) = 2660 \mu\text{m}$

# Comparaison avec quelques corrélations.



Données fabricant

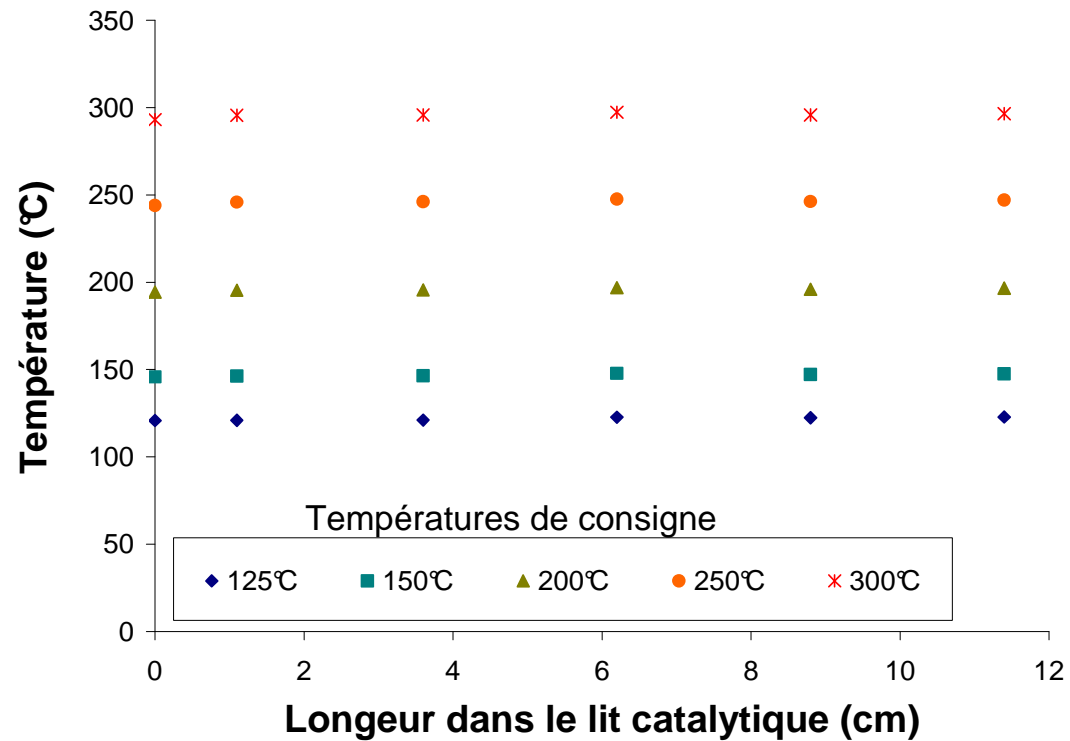
PPI = 37

$\varepsilon = 87\%$

IMorph	Lacroix et al	Innocentini et al	Incera Garrido et al
$D_s = 260 \mu\text{m}$ $D_c = 1150 \mu\text{m}$ $\varepsilon = 0.73$	$D_p = f(\varepsilon_{fab}, PPI) = 1160 \mu\text{m}$ $D_p^{bis} = f(\varepsilon_{Imorph}, \phi_{sphere}) + \text{cubique}$ $D_p^{bis} = 381 \mu\text{m}$ $D_p^{ter} = f(\varepsilon_{Imorph}, d_{strut})$ $D_p^{ter} = 390 \mu\text{m}$	$D_p = f(\varepsilon_{fab}, PPI) = 566 \mu\text{m}$ $D_p^{bis} = f(\phi_{sphere}) + \varepsilon_{Imorph}$ $D_p^{bis} = 654 \mu\text{m}$	$D_p = f(\varepsilon_{fab}, PPI) = 2530 \mu\text{m}$ $D_p^{bis} = f(\phi_{sphere} + \phi_{struts}) = 1410 \mu\text{m}$ $D_p^{bis'} = f(\phi_{ellipse}^{max} + \phi_{struts}) = 1860 \mu\text{m}$ $D_p^{ter} = f(a, b, c_{ellipse}) = 2680 \mu\text{m}$

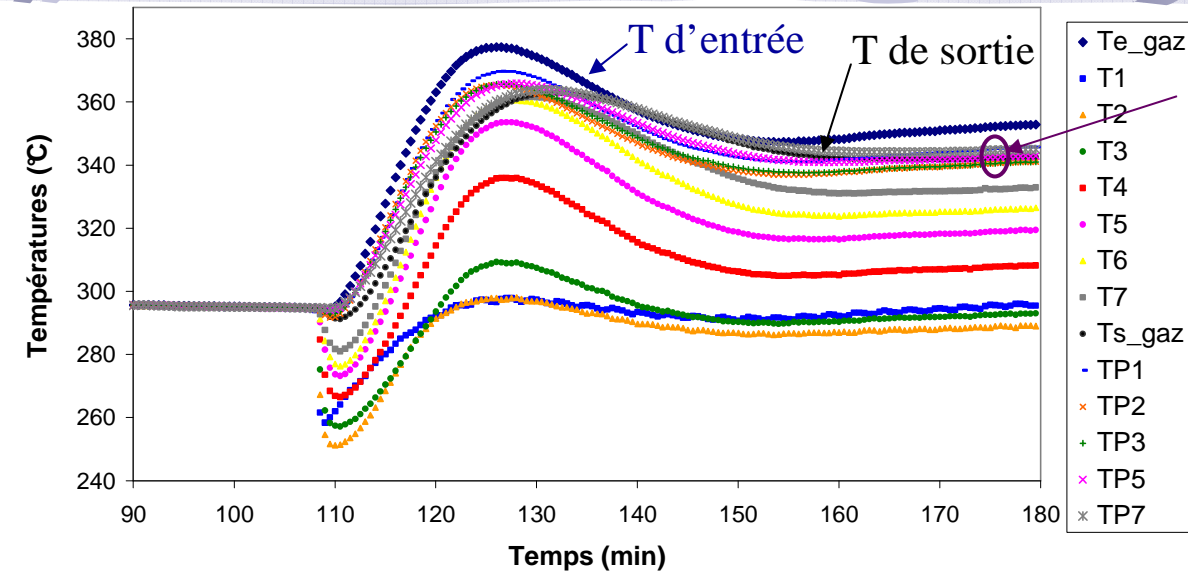
# Transferts de chaleur sans réaction.

Pertes du réacteur: pas de débit de gaz, conduction pure



$$P_w = \alpha(T_w - T_{amb})$$

# Exemple de données obtenues.



T de parois

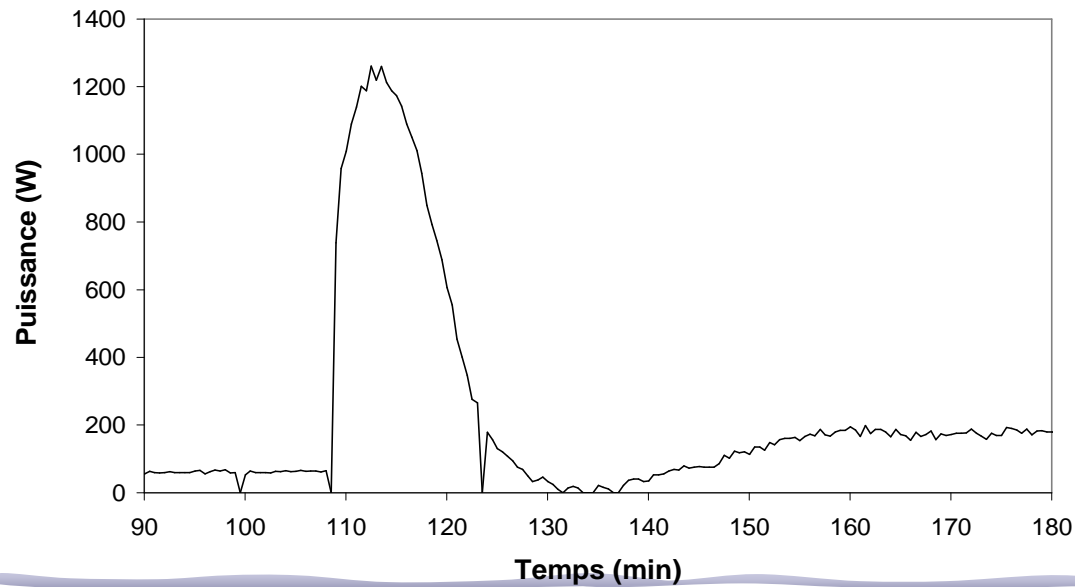
Lit de bille:

$$T_{\text{consigne}} = 300^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{\text{MCH}} = 2 \text{ g/min}$$

$$Q_{\text{H}_2} = 0.45 \text{ Nl/min}$$

$$X = 92\%$$





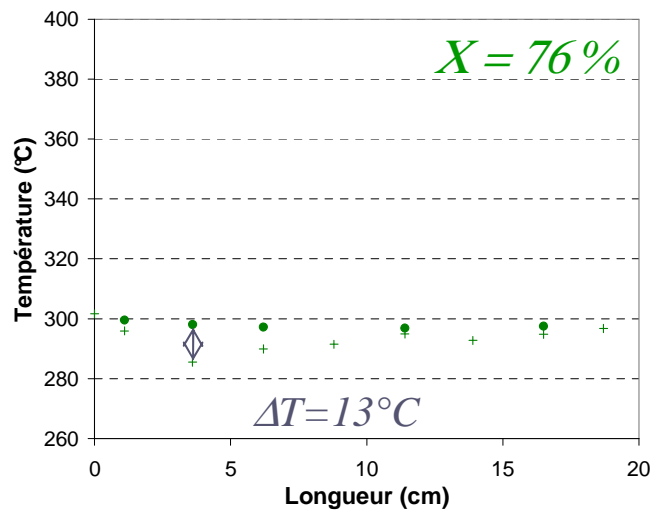
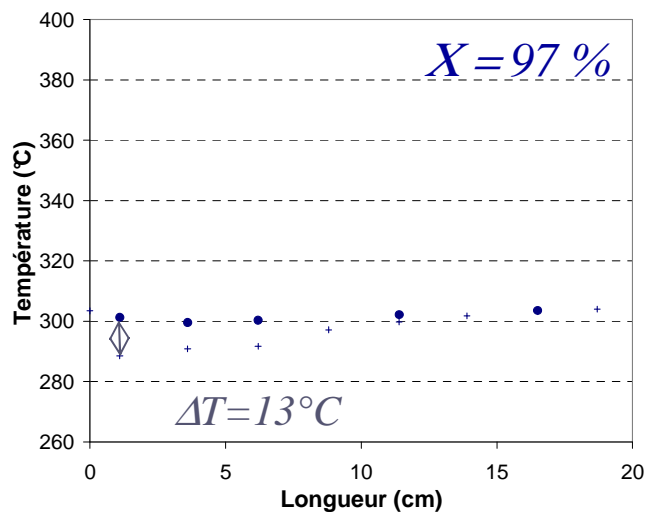
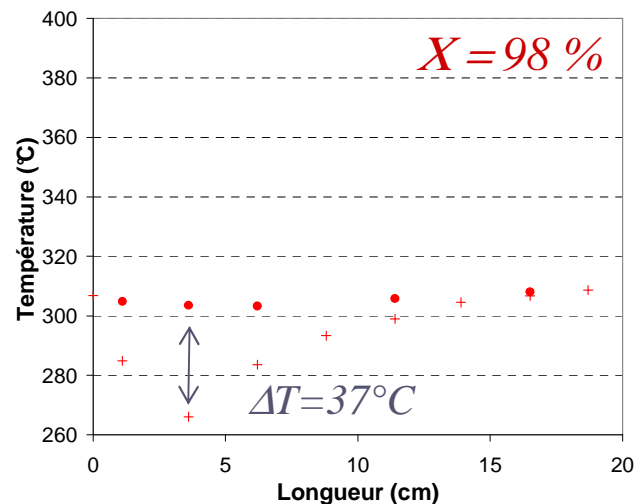
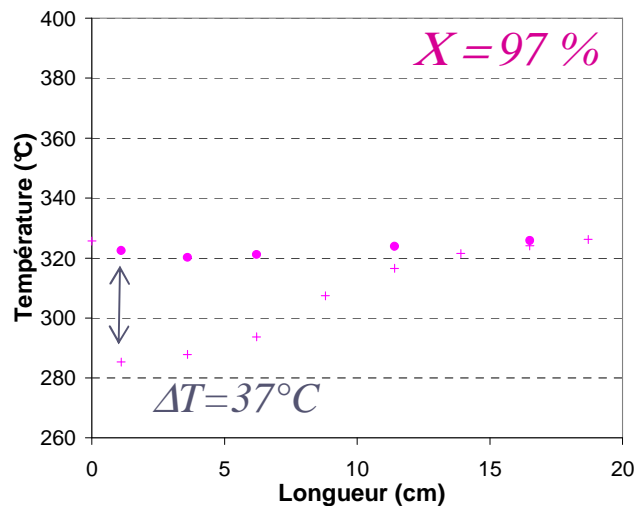
# Comparaison: T=300°C

$Q_{H_2} = 0.45$  LSTP/min ,  $Q_{MCH} = 1$ g/min

Molecular sieves  
Beads:  
2mm

●  $T_{\text{paroi}}$   
+  $T_{\text{centre}}$

F2:  
Metallic  
33 ppi  
 $\epsilon=81\%$



F1:  
Metallic  
33 ppi  
 $\epsilon=97\%$

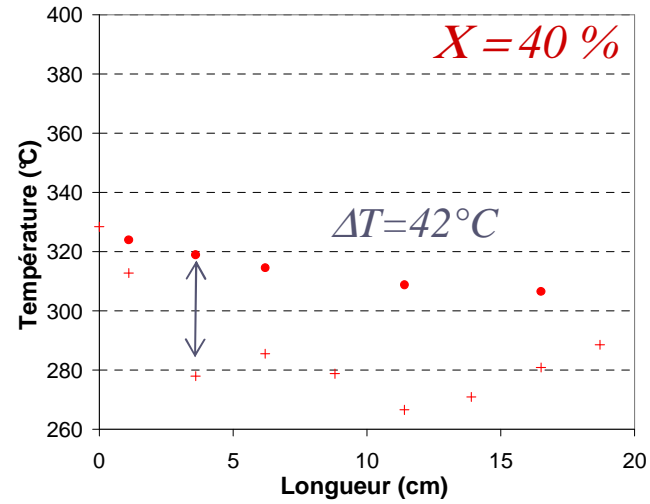
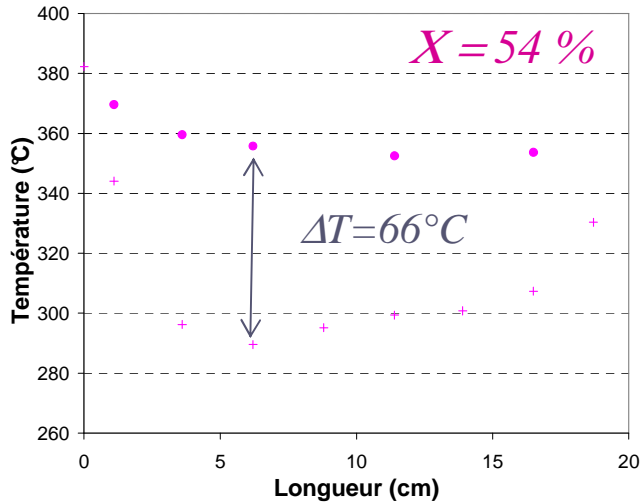
F3:  
Ceramic  
37 ppi-  
 $\epsilon=87\%$

# Comparaison: $T = 300^{\circ}\text{C}$

$Q_{\text{H}_2} = 0.45 \text{ LSTP/min}$ ,  $Q_{\text{MCH}} = 6\text{g/min}$

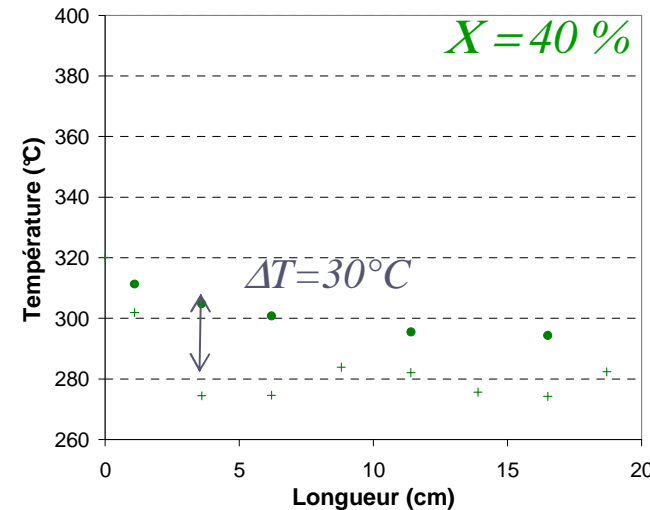
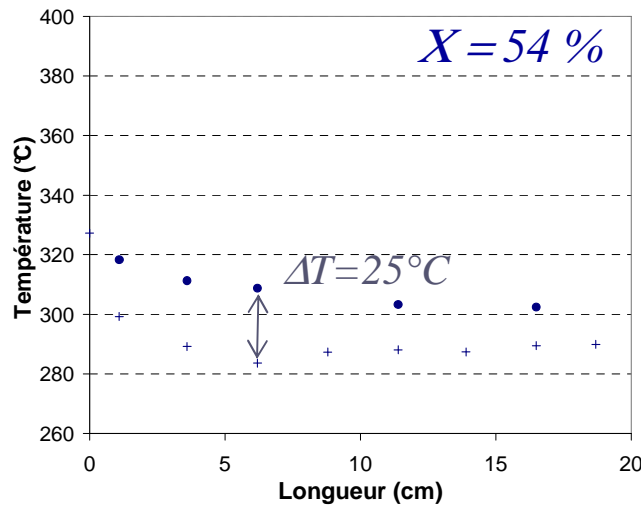
Molecular sieves  
Beads:  
2mm

●  $T_{\text{paroi}}$   
+  $T_{\text{centre}}$



F1:  
Metallic  
33 ppi  
 $\epsilon = 97\%$

F2:  
Metallic  
33 ppi  
 $\epsilon = 81\%$

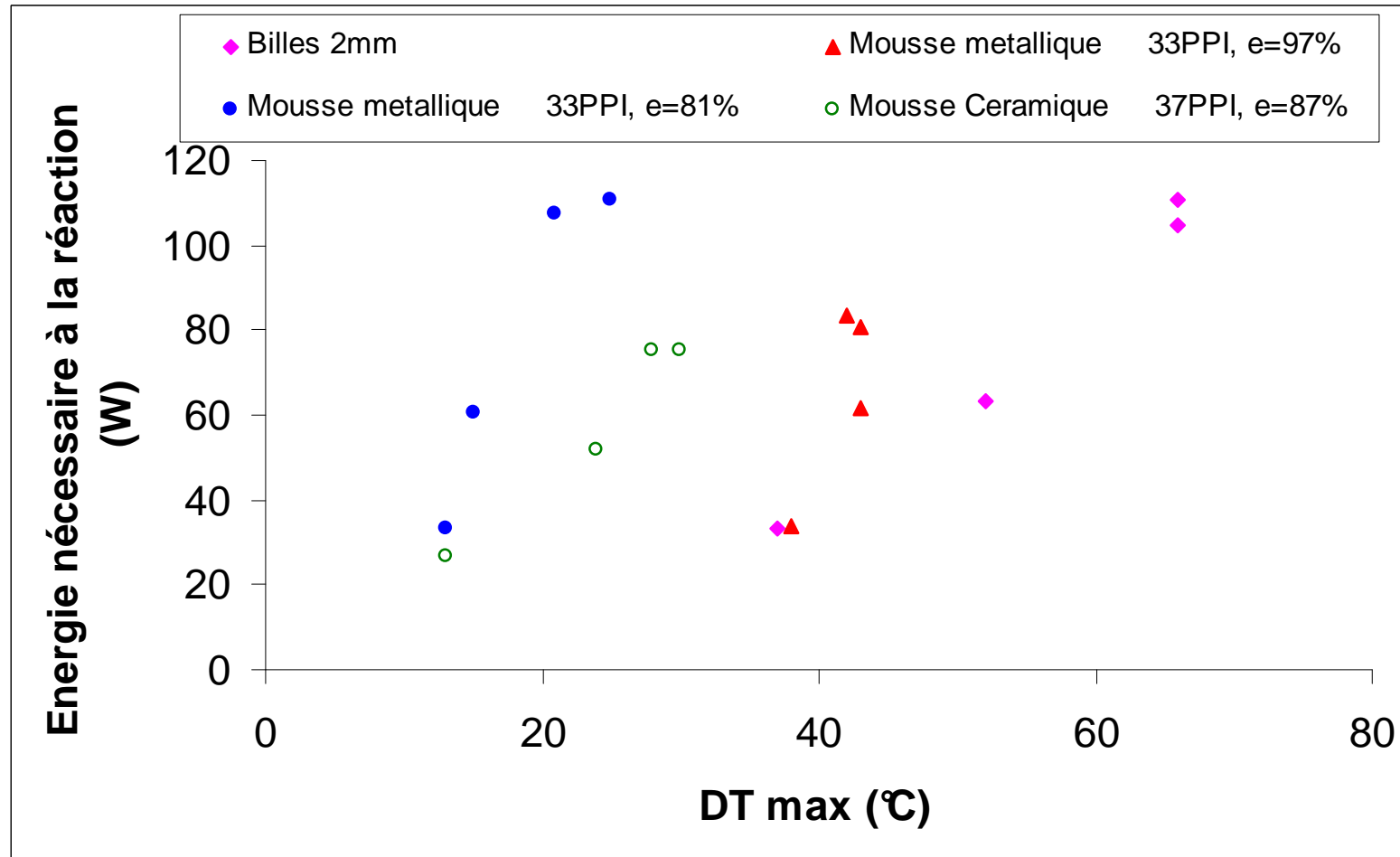


F3:  
Ceramic  
37 ppi-  
 $\epsilon = 87\%$

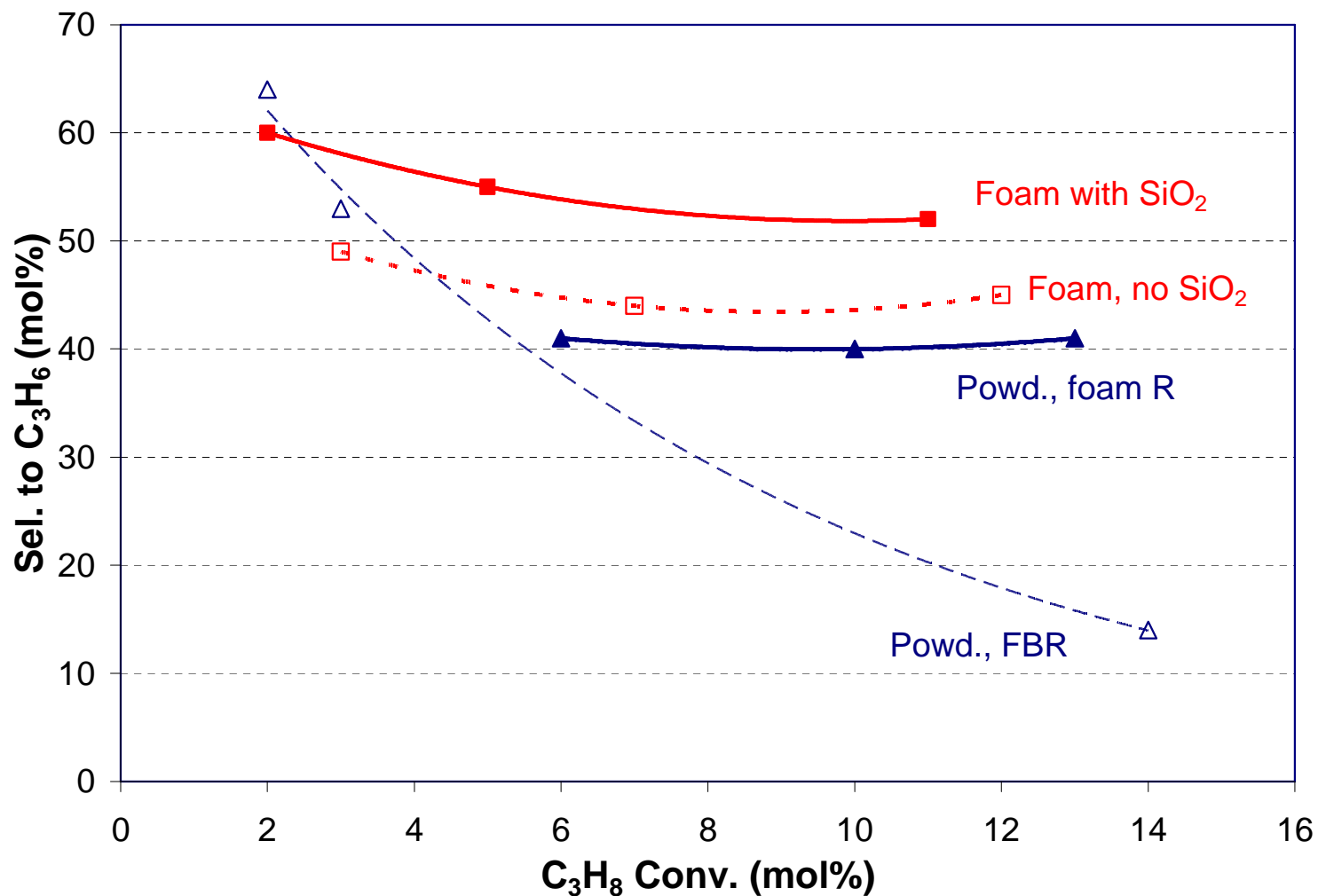
# Gradients thermiques max ( $\Delta T_{max}$ )

	Billes 2mm		Mousse metalique 33PPI, $\epsilon=97\%$		Mousse metalique 33PPI, $\epsilon=81\%$		Mousse Ceramique 37PPI, $\epsilon=87\%$	
	$\Delta T$ (°C)	RE (W)	$\Delta T$ (°C)	RE (W)	$\Delta T$ (°C)	RE (W)	$\Delta T$ (°C)	RE (W)
QMCH = 1g/min QH2 = 0,45 L/min T = 300	37	33,5	38	33,8	13	33,1	13	26,8
QMCH = 2g/min QH2 = 0,45 L/min T = 300	52	63,5	43	61,4	15	60,7	24	51,6
QMCH = 4g/min QH2 = 1L/min T = 300	66	104,6	43	80,9	21	107,4	28	75,3
QMCH = 6g/min QH2 = 0,45 L/min T = 300	66	110,9	42	83,7	25	110,9	30	75,3
QMCH = 4g/min QH2 = 1L/min T = 325	102	118,5	65	117,1	31	125,5	40	99
QMCH = 6g/min QH2 = 0,45 L/min T = 325	66	129,7	72		35	142,2	31	119,2

# Gradient thermique maximum ( $\Delta T_{max}$ ) vs énergie transférée



# Déshydrogénation oxydante du propane



# Conclusions

- Possibilité d'enduire une mousse jusqu'à  $100 \text{ kg}_{\text{cata}}/\text{m}^3_{\text{foam}}$  sans observer une augmentation de pression trop importante.
- Pour les réactions, très endo ou exothermique, non limitées par le transfert externe (et pour des  $Re$  faibles) les mousses montrent une augmentation de la conductivité thermique effective du lit catalytique/ lit de billes.
- La conductivité thermique effective du lit catalytique augmente avec la densité de la mousse.
- Attention aux transferts de matière externes en lien à l'hydrodynamique dans les mousses.

# Mousse céramique

